

LE CONTEXTE ▶ Que sait-on de la stabilité du climat ? Le système fait intervenir l'atmosphère, les océans et les calottes de glace, qui ont chacun un rôle et une dynamique spécifique. Non seulement ces différents compartiments interagissent de façon non linéaire, mais ils sont aussi en relation avec d'autres systèmes com-

plexes, tel le cycle du carbone. Et l'ensemble peut être perturbé par différentes causes externes, comme un changement d'insolation, qui elles aussi agissent à différentes échelles spatiales et temporelles. La variabilité naturelle du climat est donc forte, mais reste mal connue. Il est ainsi difficile de déterminer un état d'équi-

libre ou de discerner une tendance à long terme. Depuis vingt ans, modélisateurs, paléoclimatologues et océanographes explorent parallèlement les oscillations les plus rapides, les phénomènes de seuil qui déclenchent les transitions les plus brutales, pour déceler les conditions d'un changement de climat.

Le climat va-t-il basculer ?

La climatologie n'échappe pas aux paradoxes : de nombreux indices laissent penser que le réchauffement de la planète pourrait induire un refroidissement brutal d'une partie de l'hémisphère Nord. Au premier plan du processus : l'apport en eau douce à l'immense tapis roulant des masses d'eau océaniques, véritable « talon d'Achille » du climat.

Cet article est la version revue et mise à jour par l'auteur du texte paru dans le n° 373 de *La Recherche*.

Édouard Bard, professeur au Collège de France, est titulaire de la chaire d'évolution du climat et de l'océan. Il travaille au Cerege (CNRS - université Aix-Marseille-III), Europôle de l'Arbois, à Aix-en-Provence.

bard@cerege.fr

Le réchauffement de la planète pourrait-il, paradoxalement, provoquer un refroidissement rapide du climat dans l'hémisphère Nord autour de l'océan Atlantique ? Il aurait été intéressant de sonder à la sortie des salles les spectateurs du dernier film catastrophe hollywoodien *Le Jour d'après*. À grand renfort d'effets spéciaux, la menace y est présentée comme imminente et la communication autour du film est venue renforcer cette idée auprès du grand public. Cette année, un second événement médiatique a participé de cette crainte climatique : c'est la fuite dans les médias d'un rap-

port commandité par les militaires du Pentagone. Il s'agit là aussi d'un scénario-catastrophe, destiné à évaluer « ses implications pour la sécurité des États-Unis ». Son point de départ se situe en 2010 avec un arrêt de la circulation océanique profonde qui aurait des conséquences climatiques et géopolitiques désastreuses, « entraînant des conflits, des batailles et même des guerres... » Le rapport du Pentagone envisage aussi des questions plus précises : par exemple, vers l'année 2020 en Europe des « conflits armés entre la France et l'Allemagne pour l'accès commercial au Rhin », en Asie « la Chine



LES ÉCHANGES D'ÉNERGIE ET D'EAU ENTRE L'OCÉAN ET L'ATMOSPHÈRE gouvernent en grande partie le climat de la planète.

©Stuart Franklin/Magnum photos.

intervient au Kazakhstan pour protéger les pipelines régulièrement perturbés par des rebelles et des criminels », et aux États-Unis « le département américain de la Défense gère les frontières et les réfugiés arrivant des Caraïbes et d'Europe ». Loin de ces visions apocalyptiques très exagérées, les climatologues et les océanographes accumulent pourtant les observations qui attestent une évolution récente de l'océan Atlantique. Des simulations numériques montrent qu'une transition brusque est possible. Mais quand et dans quelles conditions ?

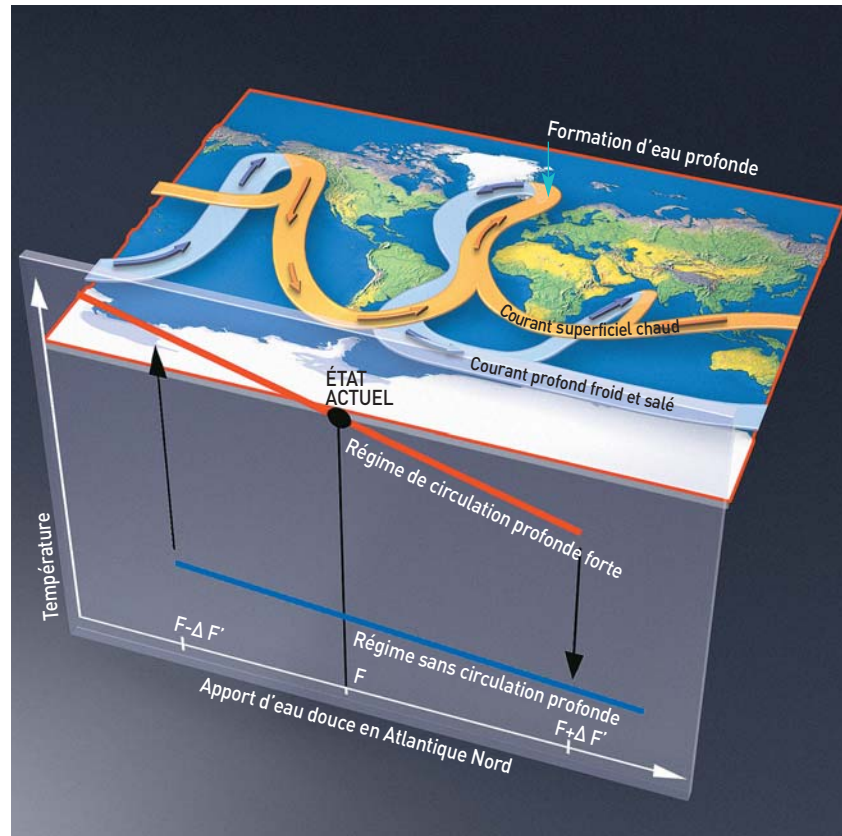
Selon différentes études, les masses d'eau de l'Atlantique Nord se sont modifiées au cours des dernières décennies. Les enregistrements hydrographiques des quarante dernières années attestent, par exemple, une baisse de la salinité des eaux dans cette région [1]. Des variations de température allant jusqu'à un degré ont également été décelées dans le premier kilomètre d'eau sur la même période [2]. Enfin, des travaux suggèrent même une diminution de l'intensité de la circulation d'eau profonde [3] et un ralentissement récent des courants marins de la zone subpolaire de l'Atlantique [4].

Bien que le recul soit encore très insuffisant, certains scientifiques voient dans ces variations le signe d'un changement du climat mondial. Pourquoi ? Parce que tous ces changements ont lieu dans l'Atlantique Nord, une région cruciale pour la circulation océanique mondiale. Or, dans le système complexe qu'est la machine climatique, le couple formé par l'océan et l'atmosphère joue les premiers rôles. Même si d'autres facteurs interviennent, les échanges d'énergie et d'eau entre les deux gouvernent en grande partie le climat de la planète. Des perturbations dans l'atmosphère ont des

[1] B. Dickson et al., *Nature*, 416, 832, 2002 ; R. Curry et al., *Nature*, 426, 826, 2003.
[2] S. Levitus et al., *Science*, 287, 2225, 2000 ; S. Levitus et al., *Science*, 292, 267, 2001 ; T.P. Barnett et al., *Science*, 292, 270, 2001.
[3] B. Hansen et al., *Nature*, 411, 927, 2001.
[4] S. Häkkinen et P.B. Rhines, *Science*, 304, 555, 2004.

* Dans un phénomène d'hystérésis, la réponse d'un système à la variation d'un paramètre physique ne dépend pas seulement de l'amplitude de cette variation, mais aussi d'un effet de « mémoire » du système qui crée un retard à la réponse.

POURQUOI LE CHAUD PEUT ENTRAÎNER LE FROID



Les différents bassins océaniques du Globe échangent en permanence des masses d'eau en surface et en profondeur selon une gigantesque boucle [5]. Dans cette boucle, les eaux de surface, chaudes et salées, des régions tropicales de l'océan Atlantique remontent vers le Nord. Arrivées en mers de Norvège, du Groenland et du Labrador, froides et denses, elles plongent dans les abysses. Cette densité contrôle le régime de circulation générale. L'apport en eau douce (pluies, fleuves et glace) dans cette région, qui diminue la densité, est donc crucial : il peut faire basculer le système climatique, en particulier les températures dans et autour de l'Atlantique

Nord, d'un mode à un autre selon un cycle d'hystérésis [5, 15, 20]. Dans ce schéma, la branche supérieure en rouge, sur laquelle se situe le climat actuel, correspond à un régime de circulation profonde forte. Une légère augmentation du flux d'eau douce par rapport à sa valeur actuelle (F) entraîne une légère diminution de la convection profonde et un refroidissement modéré en Atlantique Nord. Mais si le flux d'eau douce atteint un seuil critique ($F + \Delta F$), le système peut basculer vers un autre régime, tout aussi stable, qui se traduit par une quasi-absence de circulation profonde et un refroidissement d'environ 5°C en Atlantique Nord et sur les continents voisins.

Ce mode est représenté par la branche inférieure en bleu. La transition entre les deux est très rapide, quelques décennies suffisent. Pour revenir au mode chaud d'origine, le flux d'eau douce doit diminuer jusqu'à une autre valeur de seuil ($F - \Delta F'$) très inférieure à la première. Ce diagramme est très schématique et la position exacte du climat actuel par rapport aux points de bifurcation est pratiquement inconnue. La forme précise, en particulier la largeur, $\Delta F + \Delta F'$, du cycle d'hystérésis dépend de conditions externes au couple océan-atmosphère, comme l'insolation, le volume des calottes de glace ou les teneurs en gaz à effet de serre.

répercussions sur l'océan et vice-versa. Mais chacun de ces éléments a une dynamique et un temps de réaction différents. L'océan a notamment une inertie plus grande. À un équilibre donné entre ces différents réservoirs correspond donc un certain régime climatique : une période globalement chaude, par exemple. Étant entendu qu'un régime stable possède aussi une variabilité inter-annuelle et à l'échelle des décennies, comme le phénomène El Niño.

D'un régime stable à l'autre

Des premiers modèles analytiques publiés en 1961 par Henry Stommel [5], du MIT et de l'université Harvard aux modèles numériques actuels de circulation générale les plus sophistiqués, tout un ensemble de travaux ont montré que ce couple peut adopter différents régimes stables et basculer de l'un à l'autre très rapidement, en quelques décennies seulement (voir l'encadré ci-contre). En outre, théoriquement, ce comportement présente un phénomène d'hystérésis* : une fois que le basculement s'est produit sous l'effet d'une perturbation, il ne suffit pas d'annuler cette dernière pour revenir à l'état antérieur. Le changement n'est réversible que par une nouvelle perturbation inverse, plus importante que la première. Les contours réels de ce cycle d'hystérésis restent cependant mal connus.

Dans le régime climatique actuel, c'est dans le Nord de l'océan Atlantique que se forment les eaux qui vont plonger dans les abysses, ventiler et oxygéner les couches profondes de l'océan mondial. Cette masse d'eau profonde fait partie d'une gigantesque boucle, appelée circulation thermohaline mondiale et souvent présentée comme un immense « tapis roulant ». Cette simplification, exagérée, est néanmoins utile pour se représenter les échanges d'eau entre les différents bassins océaniques. Celui qui a popularisé cette image, Wallace Broecker, de l'université Columbia à New York, est aussi celui qui, en 1985, a averti le premier la communauté scientifique : « La circulation thermohaline pourrait bien être le "talon d'Achille" du climat [6]. »

Selon lui, en modifiant fortement le cycle de l'eau, et en particulier le flux d'eau douce vers l'océan Atlantique, le réchauffement de la planète pourrait déstabiliser ce tapis roulant. Le flux d'eau douce, alimenté essentiellement par les pluies, les fleuves et la fonte des glaces, joue en effet sur la densité des eaux de surface. Or, la densité est le paramètre qui contrôle la plongée en profondeur des masses d'eau en Atlantique Nord... À la fin des années 1990, dotés de modèles numériques performants, Thomas Stocker et Andreas Schmittner, de l'université de Berne [7], d'une part, et Ronald Stouffer et Syukuro Manabe à Princeton [8], d'autre part, ont, les premiers, testé l'hypothèse de Wallace Broecker. Leurs simulations d'états transitoires ont montré qu'on pouvait, en effet, faire basculer le climat actuel vers un tout autre régime. Une augmentation de la teneur atmosphérique en dioxyde de carbone d'environ 500 ppmv^* en un siècle conduirait ainsi à un refroidissement généralisé en Atlantique Nord, associé à une forte diminution de la circulation profonde de l'océan Atlantique. Mais dans quelles conditions exactes bascule-t-on d'un régime à l'autre ? Est-ce vraiment possible dans un contexte de réchauffement ? Où se situe précisément le régime actuel ? Malgré l'utilisation de modèles de plus en plus perfectionnés ces toutes dernières



LE CHERCHEUR AMÉRICAIN WALLACE BROECKER a le premier mis en évidence le risque de déstabilisation du « tapis roulant » océanique sous l'effet du réchauffement.

© American Geophysical Union/courtesy AIP Emilio Segrè Visual Archives

années pour étudier l'amplitude, la durée et les conditions d'initiation de ces transitions brutales, ces questions restent ouvertes, et le débat entre modélisateurs animé. Pour certains, une transition de ce type ne peut pas se produire au cours d'une période globalement chaude, la modification du cycle de l'eau nécessaire pour déstabiliser un tel régime étant trop importante. Pour

les autres, une telle instabilité est tout à fait possible.

Les observations du passé permettent-elles de trancher ? De pareils changements brutaux se sont-ils produits au cours de l'histoire de la Terre ? Heureusement, la période historique n'a jamais connu d'événements aussi extrêmes. Mais qu'en est-il du passé plus lointain ? Pour l'étudier, de nombreux paléoclimatologues se sont intéressés ces dernières années aux carottes de glace prélevées au Groenland et de sédiments marins extraites en Atlantique Nord.

Ces deux types d'archives peuvent être datés et synchronisés précisément à l'aide de techniques variées. Les températures passées sont déterminées à partir des teneurs de différents isotopes* de l'oxygène mesurés sur les molécules d'eau conservées dans la glace, pour le Groenland [9]. Pour l'océan Atlantique, elles sont obtenues à partir de molécules spécifiques (les alkenones) synthétisées par le phytoplancton et bien préservées dans les sédiments marins [10].

L'ensemble de ces données révèle qu'au cours des 100 000 dernières années, les températures au Groenland et en Atlantique Nord ont évolué de concert [fig. 11]. Les fluctuations les plus remarquables sont des épisodes de réchauffement sur des périodes d'environ 1 000 ans. Ces intervalles chauds sont appelés événements de Dansgaard-Oeschger en l'hon-



EN ANALYSANT LES GLACES DU GROENLAND au début des années 1980, Willie Dansgaard (à gauche) et Hans Oeschger (à droite) ont identifié dans les carottes plusieurs épisodes de réchauffement. © aip.org



HARTMUT HEINRICH a proposé une origine climatique aux couches de débris découvertes dans les sédiments de l'Atlantique Nord. © DR

* **ppmv** : la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère se mesure en parties par million (0,0001 %). Elle atteint aujourd'hui les 380 ppmv.

* **Les isotopes** d'un élément chimique ont tous le même nombre de protons mais se distinguent par leur nombre de neutrons.

[6] W.S. Broecker et al., *Nature*, 315, 21, 1985.

[7] T.F. Stocker et A. Schmittner, *Nature*, 388, 862, 1997.

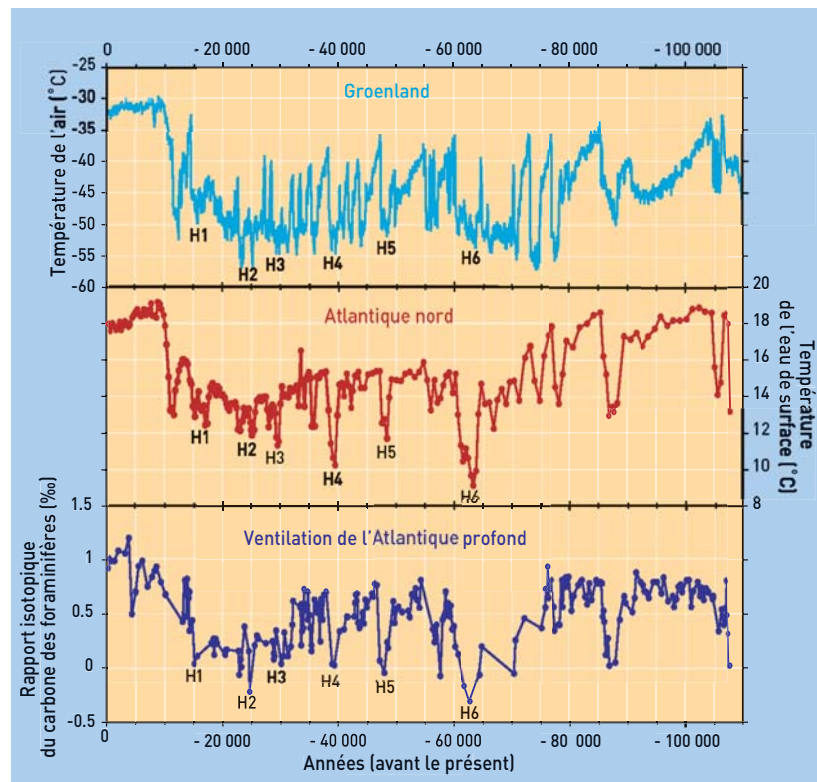
[8] S. Manabe et R.J. Stouffer, *Nature*, 364, 215, 1993; S. Manabe et R.J. Stouffer, *J. Clim.*, 7, 5, 1994; R.J. Stouffer et S. Manabe, *J. Clim.*, 12, 2224, 1999.

[9] W. Dansgaard et al., *Nature*, 364, 218, 1993; North GRIP members, *Nature*, 431, 147, 2004.

[10] E. Bard et al., *Science*, 289, 1321, 2000; E. Bard, *Physics Today*, 55, 32, 2002.

[5] H. Stommel, *Tellus*, 13, 224, 1961.

Fig.1 110 000 ans d'archives



COMMENT LE CLIMAT A-T-IL VARIÉ AU COURS DES 110 000 DERNIÈRES ANNÉES AUTOUR DE L'ATLANTIQUE NORD ? Pour le Groenland, c'est l'analyse de la composition isotopique des carottes de glace qui révèle les oscillations de la température de l'air (*courbe du haut*). Ces enregistrements décrivent des fluctuations intenses sur des périodes de l'ordre du millénaire. Les refroidissements brutaux, appelés événements de Heinrich (H1, H2, H3...) sont particulièrement marqués dans l'Atlantique Nord (*courbe au centre*). Les températures des eaux de surface ont été déterminées à partir de molécules spécifiques du phytoplancton conservées dans les sédiments de carottes prélevées au large du Portugal. Enfin la ventilation des eaux profondes en Atlantique est reconstituée grâce aux isotopes du carbone mesurés sur des micro-organismes marins préservés dans ces carottes (*courbe du bas*). Les événements de Heinrich correspondent à un rapport faible qui traduit une moindre ventilation et un refroidissement. A contrario, un rapport élevé atteste d'une ventilation intense et d'un régime chaud.

neur de deux pionniers, Willie Dansgaard, de l'université de Copenhague, et Hans Oeschger, de l'université de Berne, les premiers à en avoir identifié et décrit dans les glaces du Groenland au début des années 1980. Ces réchauffements, particulièrement marqués au Groenland où la température augmente de plus de 10 °C, sont plus atténués dans l'océan Atlantique. En revanche les sédiments marins ont enregistré une dizaine de coups de froid intenses moins forts dans les carottes de glace.

Ces refroidissements se repèrent d'autant plus facilement dans les fonds océaniques que les niveaux sédimentaires, qui en attestent *via* les alkenones, conservent aussi des débris transportés par les icebergs. C'est Hartmut Heinrich, un géologue de l'institut allemand d'hydrologie à Hambourg, qui, à la fin des années 1980, comprit l'origine de ces couches de débris dits « détritiques » [11] : en rabotant le socle rocheux canadien, l'énorme calotte de glace Laurentide produisait ces sédiments gros-

siers [fig. 2], transportés ensuite plus ou moins bas dans l'Atlantique par les icebergs. Dénombrés directement sous une loupe binoculaire ou identifiés par l'analyse de leurs propriétés chimiques et magnétiques, ces débris signalent les épisodes de débâcles d'icebergs, désormais baptisés « événements de Heinrich ». Et chacun d'eux correspond à un refroidissement intense, d'environ 4 °C, survenu en quelques dizaines d'années.

Une alternance rapide de chauds et de froids a donc bien eu lieu en Atlantique Nord et autour du Groenland. Mais ces transitions ont-elles un rapport avec la circulation thermohaline ? Les carottes de sédiments recèlent un autre indice précieux [12] dans les coquilles d'organismes unicellulaires microscopiques qui vivent au fond de l'océan : ces foraminifères enregistrent dans leur squelette le rapport des isotopes de carbone 13 et 12 du carbone inorganique dissous dans les eaux profondes. Or, ce rapport dépend de la ventilation de l'océan profond. Une circulation profonde intense se traduit par un rapport élevé, et des courants moins vigoureux par un rapport faible.

Réchauffement planétaire de 4 °C

D'après ces enregistrements, au cours des 100 000 dernières années, la convection de l'Atlantique Nord a connu trois niveaux d'intensité. Le plus fort dure depuis 11 500 ans, soit toute la période Holocène. Auparavant, pendant la dernière glaciation, l'océan a oscillé entre une ventilation très faible et une ventilation élevée (mais moins qu'actuellement), au même rythme que les variations de température. À chaque période de débâcle d'icebergs est associée une diminution très nette de la ventilation profonde de l'Atlantique. Cette correspondance précise entre température et circulation océanique profonde constitue probablement la meilleure preuve d'un lien intime entre les deux compartiments, océan profond et atmosphère, lors de ces variations rapides. Après la dernière glaciation, le climat s'est réchauffé partout sur la planète,

en moyenne de l'ordre de 4 °C. Ce climat globalement chaud est-il plus stable ? La variabilité climatique de tout l'Holocène est en tout cas bien plus faible que celle des périodes glaciaires. Depuis 11 500 ans, les températures du Groenland et de l'Atlantique Nord suivent une tendance continue au refroidissement, mais de faible amplitude. L'unique coup de froid important s'est produit il y a environ 8 200 ans. Mais il est de moindre amplitude et de plus courte durée que les fluctuations observées en période glaciaire.

Sédimentologues et glaciologues pensent que ce refroidissement serait dû à un apport soudain d'eau douce dans l'Atlantique Nord [13].

Rappelons que pendant la glaciation, la calotte Laurentide, épaisse de quatre kilomètres, a entraîné une forte dépression du continent sous-jacent. Quand la glace a commencé à y fondre, la calotte centrée sur la baie d'Hudson bloquait encore aussi bien la baie que ses exutoires, et un vaste lac s'est formé au sud de la Laurentide. Mais, après la majeure partie de la déglaciation, l'eau de fonte est finalement parvenue à se frayer un chemin vers l'océan, déclenchant probablement un événement catastrophique : le canal de drainage se serait très rapidement élargi à cause de la chaleur dégagée par la turbulence, créant ainsi un chenal dans la glace ; ou, selon une autre hypothèse testée avec un modèle de calotte de glace, la calotte résiduelle aurait été littéralement soulevée par l'eau du lac, précipitant sa destruction [14]. Dans les deux cas, le plus grand lac de la surface de la Terre se serait vidé dans l'Atlantique Nord en un temps très court, entre une saison et quelques années. Un refroidissement généralisé semble avoir immédiatement suivi cette vidange. Celle-ci a vraisemblablement eu aussi un effet transitoire sur la circulation atlantique profonde, au moins sur la composante qui plonge en mer du Labrador. Bien moins impressionnant que les événements de la gla-

Fig.2 Débâcle à la trace



LORS D'UNE DÉBÂCLE, en se détachant de la calotte de glace (*ci-dessus*), les icebergs emportent avec eux des débris de socle rocheux. Ils les essaient ensuite sur les fonds océaniques de l'Atlantique Nord. Grâce à ces débris préservés dans les sédiments, il est possible de repérer les débâcles nommées événements de Heinrich (épisodes froids).

Des chercheurs ont simulé un apport d'eau douce en Atlantique Nord de l'ordre du débit de l'Amazonie.

ciation, ce refroidissement du début de l'Holocène revêt néanmoins une importance particulière puisqu'il prouve qu'un climat globalement chaud peut être soudainement perturbé.

Arrêt de la circulation profonde

Les modèles actuels sont-ils capables de reproduire l'alternance des fluctuations passées ? Les plus complets, ceux qui prennent en compte les interactions entre l'atmosphère, l'océan et les calottes de glace, sont encore loin de pouvoir décrire une variabilité à cette échelle de temps et d'espace. À ce jour, tous les essais ont été réalisés avec des modèles simplifiés et des perturbations imposées par les modélisateurs.

Andrey Ganopolski et Stefan Rahmstorf, du centre de climatologie de Potsdam, ont obtenu l'un des résultats les

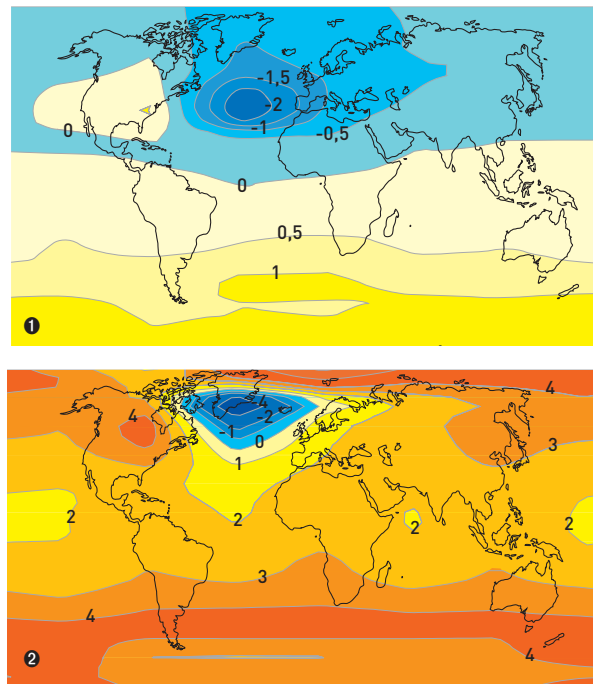
plus impressionnants, en perturbant leur modèle par un flux variable d'eau douce en Atlantique Nord : une perturbation cyclique d'amplitude relativement limitée, de l'ordre des débits réunis du Mississippi et du Saint-Laurent, provoque un comportement typique d'hystérésis de leur couple océan-atmosphère [15]. La circulation profonde de l'océan Atlantique répond de façon non linéaire, avec des changements extrêmement rapides et de grande ampleur. Ces fluctuations donnent naissance à des cycles de température de très grande amplitude aux hautes latitudes du Groenland (réchauffements de 8 °C) et de moindre intensité (+ 2 à 3 °C) aux moyennes latitudes de l'océan Atlantique Nord. Pour tenter de comprendre la genèse d'un événement de Heinrich, ces auteurs ont aussi testé les conséquences d'un apport massif d'eau douce en Atlantique Nord, de l'ordre de l'énorme débit de l'Amazonie. Résultat : la circulation d'eau profonde s'y arrête presque et cet arrêt provoque un refroidissement de l'ordre de 2 à 3 °C aux moyennes latitudes de l'Atlantique Nord [fig. 3].

Toutefois, dans les détails, la forte varia-

[13] D.C. Barber et al., *Nature*, 400, 344, 1999.
[14] G. Clarke et al., *Science*, 301, 922, 2003.
[15] A. Ganopolski et S. Rahmstorf, *Nature*, 409, 153, 2001.

Voir page suivante :
[16] S. Rahmstorf et A. Ganopolski, *Clim. Change*, 43, 353, 1999.
[17] R. Wood et al., *Nature*, 399, 572, 1999.
[18] T.L. Delworth et K.W. Dixon, *J. Clim.*, 13, 3721, 2000.
[19] T. Fichefet et al., *Geophys. Res. Lett.*, 30 (17), 1911, 2003.
[20] D. Paillard et L.D. Labeyrie, *Nature*, 372, 162, 1994.

Fig.3 Projection en 2500



LES SIMULATIONS NUMÉRIQUES peuvent-elles reproduire les fluctuations rapides du climat ? Grâce à un modèle, dit de « complexité intermédiaire », Andrey Ganopolski et Stefan Rahmstorf ont réussi à simuler un événement du type Heinrich (carte 1). On observe que pendant la débâcle, la température de l'air descend au maximum de 2 °C à 3 °C dans l'Atlantique Nord. Ces climatologues ont utilisé le même modèle pour prévoir le climat à l'horizon 2500, dans le cadre de l'un des scénarios probables d'évolution des gaz à effet de serre (carte 2) : le réchauffement mondial moyen serait d'environ 3 °C par rapport au début de l'ère industrielle. Mais, en Atlantique nord, c'est une tendance au refroidissement atteignant plus de 4 °C qui se dessinerait, le climat basculant dans un régime de circulation océanique profonde beaucoup plus faible.

***Oscillation nord-atlantique (NAO)** : cette sorte de balancier atmosphérique entre l'anticyclone des Açores et la dépression islandaise gouverne le régime de vents d'ouest au-dessus de l'Atlantique. Ses fluctuations ont notamment des conséquences directes sur le climat de l'Europe de l'Ouest.

bilité climatique de la dernière période glaciaire n'a encore jamais été modélisée. Cependant, la concordance générale entre les données et l'ensemble des simulations suggère que les mécanismes envisagés sont plausibles. Ces données et modèles montrent, en outre, que le système océan-atmosphère a été particulièrement instable à l'époque glaciaire. En comparaison, le climat moderne est bien plus stable, ce qu'attestent, comme on l'a vu, les enregistrements de températures. Le volume et la surface des calottes de glace, l'insolation et les concentrations atmosphériques en gaz à effet de serre sont autant de paramètres

très différents aujourd'hui. Si l'on tient compte de ces conditions dans le modèle, la boucle d'hystérésis devient beaucoup plus large que pendant les glaciations : il faudrait donc des perturbations du flux d'eau douce bien plus grandes aujourd'hui pour déstabiliser le système. En d'autres termes, le climat actuel serait moins susceptible de basculer vers des états extrêmes. D'après les chercheurs de Potsdam, le changement principal entre la période glaciaire et celle d'aujourd'hui tiendrait au déplacement méridional des zones de plongée des eaux profondes, au sud de l'Islande pendant la glaciation, et au nord de cette île actuellement.

Écarts régionaux

Grâce au modèle simplifié ayant servi à simuler les événements de Heinrich, les climatologues de Potsdam ont aussi testé cette stabilité dans des scénarios du futur [16]. Ils ont réalisé deux simulations à l'horizon 2500 en considérant que la teneur en dioxyde de carbone atmosphérique atteindrait 1 200 ppmv en 2150, et diminuerait régulièrement après, suite à l'abandon des combustibles fossiles après 2200. Mais ils ont utilisé, dans chacun des cas, une technique de modélisation différente des flux d'eau liés à la fonte des icebergs du Groenland, et des échanges d'eau atmosphérique en Atlantique Nord. Si les deux résultats conduisent à un réchauffement mondial moyen qui dépasse les 3 °C, la différence technique suffit à générer des différences régionales très importantes. Dans un cas [fig. 3], le climat bascule dans un régime de circulation océanique profonde beaucoup plus faible, qui conduit à un refroidissement de plus de 4 °C dans la zone de l'Atlantique Nord. Dans l'autre, pas. Depuis, une autre équipe de modélisation a confirmé l'impact potentiel de la fonte des glaces du Groenland [19]. Les chercheurs du Meteorological Office de Bracknell ont même été capables d'étudier l'évolution de la circulation océanique à l'aide d'un modèle océan-atmosphère à haute résolution spatiale [17]. Leurs premiers résultats suggèrent que, sous l'effet du CO₂ anthropique,

les masses d'eaux profondes de la mer du Labrador pourraient effectivement s'arrêter de plonger, mais que les zones situées plus au nord ne seraient pas affectées durant le prochain siècle.

Une autre incertitude qui pèse sur la prévision de la circulation profonde est l'influence de la variabilité atmosphérique de « haute fréquence », en particulier l'oscillation nord-atlantique (NAO)*. Thomas Delworth et Keith Dixon du Geophysical Fluid Dynamic Laboratory de Princeton, ont en effet montré qu'une phase positive de la NAO pourrait en fait retarder le basculement climatique d'une trentaine d'années [18]. Ce retard serait lié au refroidissement et à l'évaporation accrue des eaux de surface du Nord-Ouest de l'Atlantique Nord lors d'une phase NAO positive. Le problème supplémentaire est que cela fait aussi une trentaine d'années que la NAO est en phase positive, certains y voyant même l'influence des gaz à effets de serre. Les prochaines années d'observation seront donc cruciales, mais on peut noter que l'indice NAO semble baisser depuis 1995.

Ces résultats illustrent bien les nombreuses incertitudes scientifiques et techniques des prévisions à long terme du couple océan-atmosphère. Néanmoins, ils rappellent aussi, dans tous les cas, l'ampleur du réchauffement mondial qui nous attend pour la fin du XXI^e siècle. Il n'est pas exclu que le climat puisse basculer brutalement à plus longue échéance. La prudence reste donc de mise. D'autant plus que nous sommes encore incapables de prendre en compte des facteurs socio-économiques comme l'évolution à long terme de la population mondiale ou celle de sa consommation d'énergie. ■ E. B.

POUR EN SAVOIR PLUS

▷ R.B. Alley *et al.* (éd.), *Abrupt Climate Change*, National Academy Press, 2002. S.R. Hemming, ▷ R.S. Bradley, *Paleoclimatology*, Harcourt Academic Press, 1999.

▷ W.F. Ruddiman, *Earth's Climate : Past and Future*, W.H. Freeman & co., 2002. ▷ www.ngdc.noaa.gov/paleo/paleo.html

▷ www.larecherche.fr